

К. А. Золотухин, Д. К. Смирнов, Т. Ф. Богатова

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

tes.urfu@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГТУ

Рассмотрены возможности повышения экономичности цикла ГТУ. Проанализировано влияние введения промежуточного охлаждения на эффективность газотурбинного цикла. Выполнен сравнительный анализ эффективности различных циклов. Приведена оценка эффективности работы ГТУ в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре и начальной температуры газов на входе в ГТ. Показано, что при определении оптимальных параметров работы ГТУ необходимо учитывать наличие охлаждающих потоков в ГТ, а также изменение удельной теплоемкости рабочего тела в зависимости от его состава и температуры.

Ключевые слова: газотурбинная установка; промежуточное охлаждение; степень повышения давления; начальная температура газов; КПД; полезная удельная работа ГТУ.

K. A. Zolotuhin, D. K. Smirnov, T. F. Bogatova

Ural Federal University, Ekaterinburg

INCREASE IN PERFORMANCE EFFICIENCY OF GTU

The possibilities of increase in performance efficiency of GTU cycle are considered. Influence of introduction of intercooling on efficiency of a gas-turbine cycle is analyzed. The analysis of efficiency of various cycles is made. Assessment of GTU efficiency depending on increase in pressure ratio of air in the compressor and turbine inlet temperature is given. It is shown that for determining of GTU optimum operation parameters it is necessary to consider existence of the cooling streams in GT and change of specific heat of a working medium depending on its composition and temperature.

Keywords: gas-turbine installation; intercooling; pressure ratio; turbine inlet temperature; efficiency; net specific work of GTU.

Эффективность газотурбинного цикла определяется рядом факторов. Одними из основных являются температура газов на входе в газовую турбину (начальная температура газов) $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ и степень повышения давления в компрессоре $\pi_{\text{к}}$, а также конфигурация цикла.

Анализ показателей цикла ГТУ в зависимости от сочетания этих факторов приведен в [1]. Влияние начальной температуры газов и степени повышения давления на показатели ГТУ простого цикла представлены на рис. 1. В качестве показателей эффективности ГТУ рассмотрены полезная удельная работа и КПД цикла. С ростом $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ повышается КПД цикла и возрастает удельная полезная работа. При этом существует оптимальная степень повышения давления $\pi_{\text{к}}$ с точки зрения максимальной удельной полезной работы для каждого значения $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$. Однако максимальному значению КПД при той же начальной температуре соответствует более высокое значение $\pi_{\text{к}}$. Следовательно, нужен разумный компромисс между стремлением к повышению КПД цикла и снижением удельной полезной работы цикла.

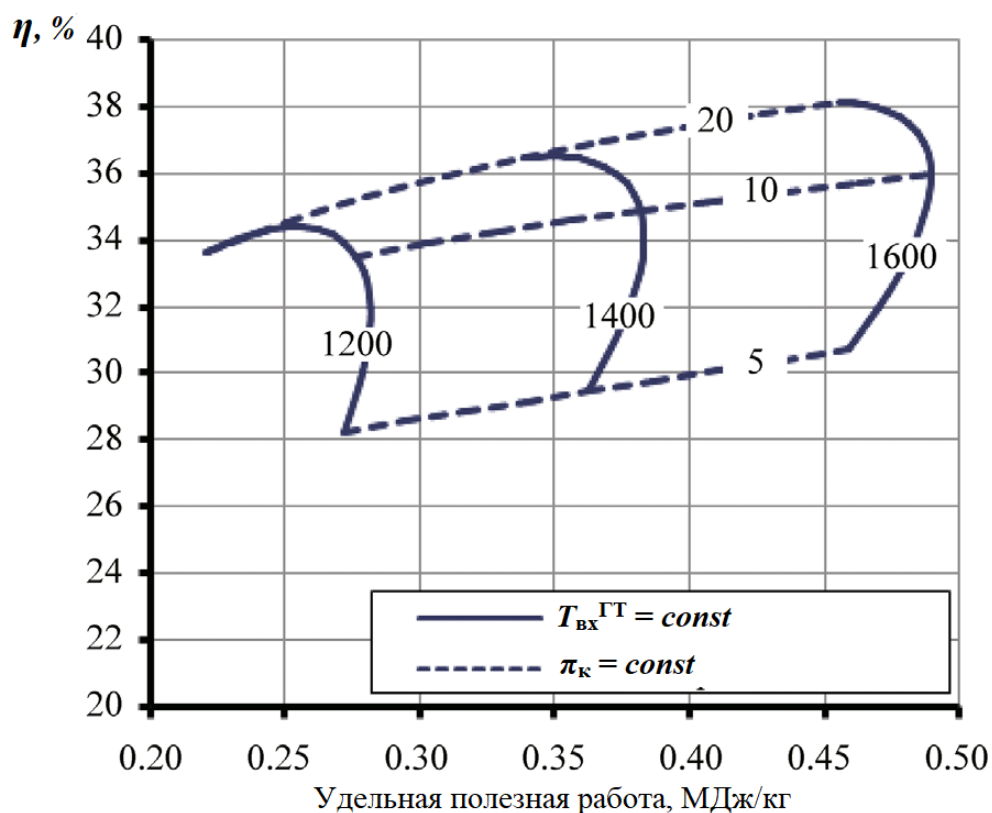


Рис. 1. Характеристики простого цикла ГТУ при различных температурах газов на входе в газовую турбину $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ и степени повышения давления $\pi_{\text{к}}$

Работу сжатия воздуха можно уменьшить за счет разделения компрессора на часть низкого давления и часть высокого давления и включения между ними промежуточного охладителя. В результате удельный объем воздуха уменьшается, и затрачиваемая на сжатие воздуха в компрессоре работа снижается. И хотя расход топлива в КС газовой турбины возрастает из-за снижения температуры воздуха, поступающего в КС из компрессора, увеличение удельной полезной работы компенсирует возросшую потребность в топливе и приводит к увеличению КПД практически для всех сочетаний $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ и $\pi_{\text{к}}$.

Удельная полезная работа и КПД возрастают при введении промежуточного охлаждения в компрессоре для любых комбинаций $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ и $\pi_{\text{к}}$ (рис. 2). Однако при низких значениях $\pi_{\text{к}}$ эффект от промежуточного охлаждения минимален, и прирост КПД незначителен.

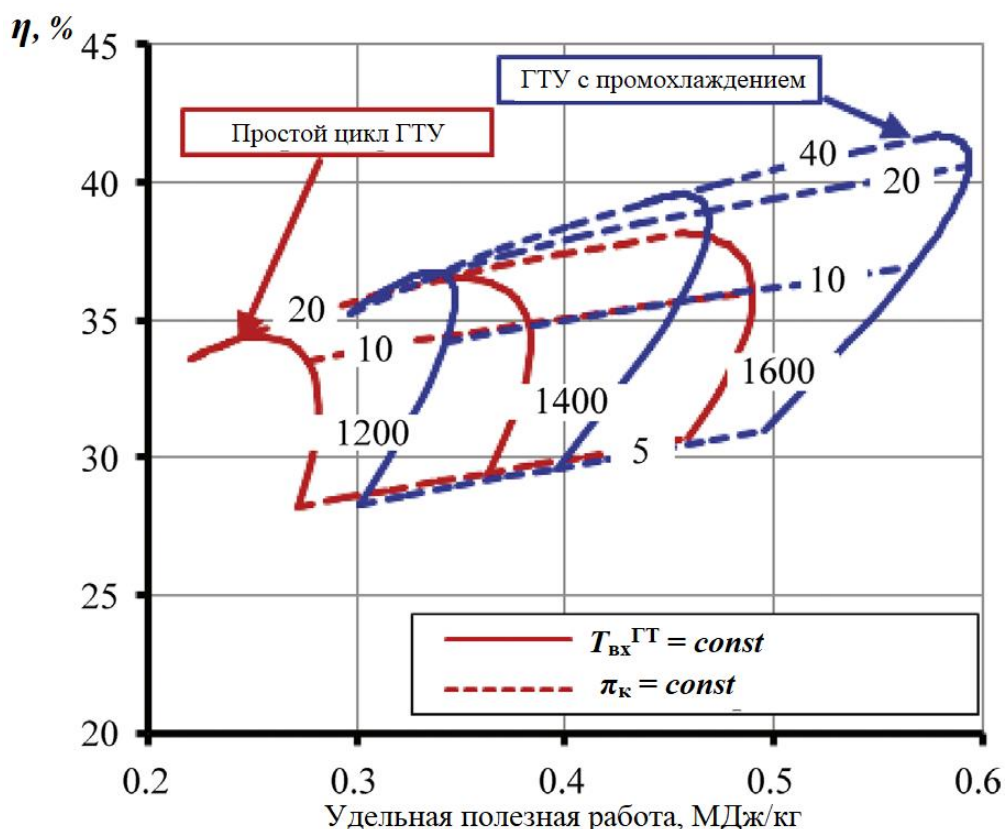


Рис. 2. Сравнение характеристик простого цикла ГТУ и цикла ГТУ с промежуточным охлаждением

Увеличение начальной температуры газов обеспечивает повышение КПД и полезной удельной работы цикла ГТУ.

Максимально возможная температура на входе в ГТ определяется достигнутым технологическим уровнем металлургии и развитием технологий охлаждения. Влияние охлаждающих потоков необходимо учитывать, иначе расчетные оптимальные значения параметров будут далеки от реальных. Так, например, в случае игнорирования влияния охлаждающих потоков при $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}} = 1600 \text{ К}$ и $\pi_{\text{к}} = 60$ удельная полезная работа ГТУ превышает расчетное значение с учетом охлаждения на 20 %, а КПД – на 5 %. Сравнение показателей цикла ГТУ без учета охлаждения и с учетом охлаждения газовой турбины приведено на рис. 3.

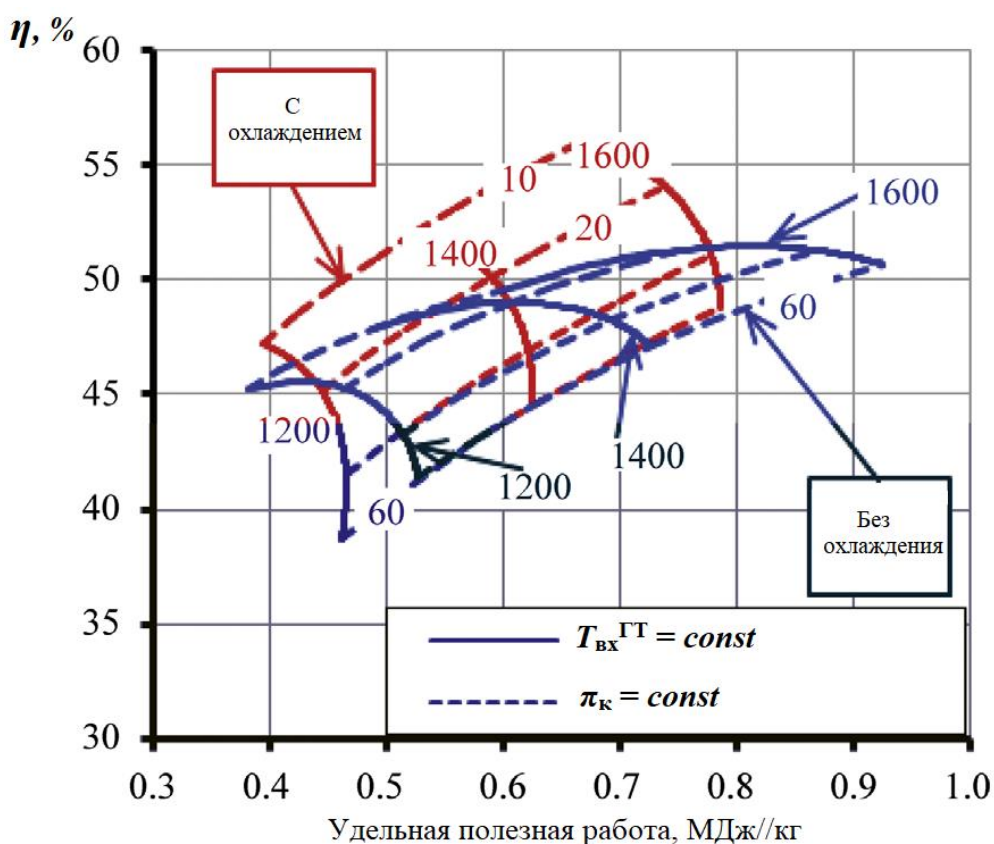


Рис. 3. Сравнение характеристик ГТУ без учета и с учетом системы охлаждения ГТ при различных $T_{\text{вх}}^{\text{ГТ}}$ и степени повышения давления $\pi_{\text{к}}$

Еще один фактор влияет на точность расчетов оптимальных параметров цикла ГТУ. Часто для упрощения расчетов значение удельной теплоемкости рабочего тела принимают постоянным, равным теплоемкости воздуха перед камерой сгорания $c_p = 1005,7 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, показатель адиабаты $k = 1,4$ (для воздуха). Однако в реальном цикле удельные теплоемкости рабочего тела изменяются в

процессе сжатия, подвода теплоты в КС и расширения. Кроме того, сжигание топлива в КС изменяется состав рабочего тела, что является еще одним фактором, влияющим на удельную теплоемкость и показатель адиабаты.

Для более точного расчета цикла ГТУ учитывают, что удельная теплоемкость рабочего тела является переменной величиной, ее значение в различных точках цикла определяют полиномами различной степени в зависимости от температуры [2]. Сравнение параметров цикла для случаев постоянной и переменной удельной теплоемкости приведено на рис. 4. Очевидно, что КПД и удельные полезные работы весьма существенно отличаются, также как и их оптимальные значения.

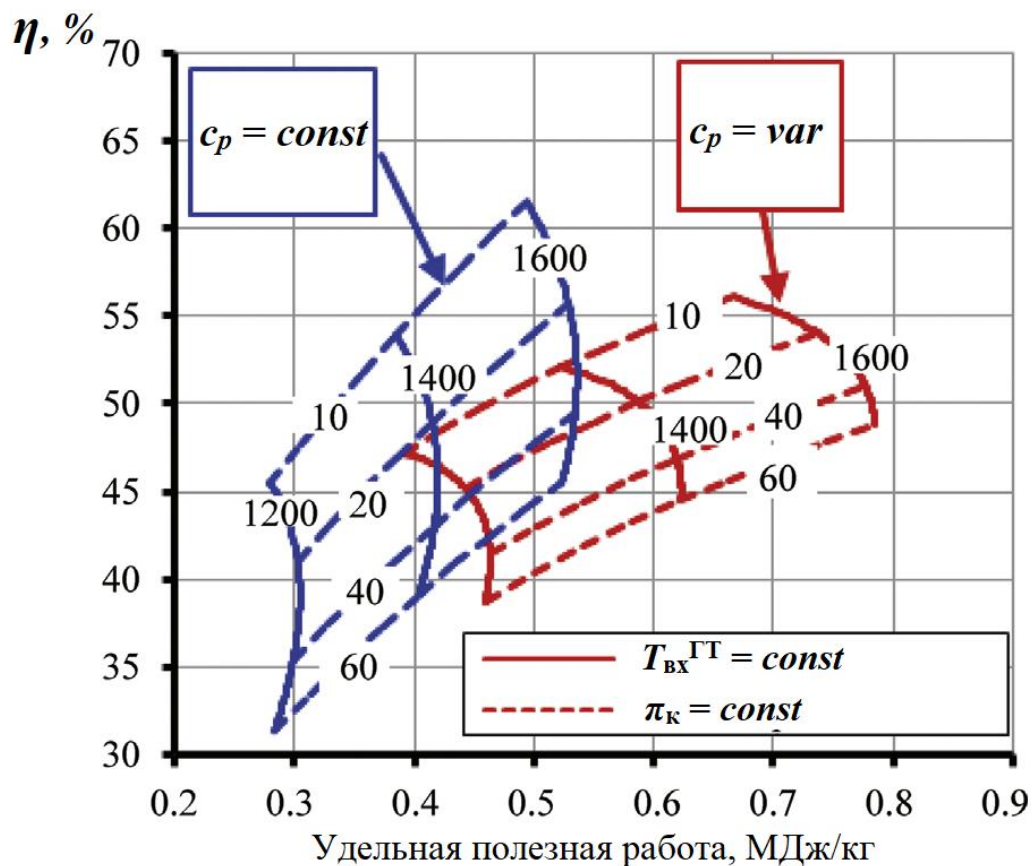


Рис. 4. Сравнение параметров цикла ГТУ при постоянной (для воздуха) и переменной удельной теплоемкости рабочего тела

В ряде случаев применяют так называемую модель двух значений удельных теплоемкостей: теплоемкости чистого воздуха перед КС $c_p = 1005,7$ Дж/(кг·К), $k = 1,4$ и теплоемкости продуктов

сгорания $c_p = 1156,9$ Дж/(кг·К), $k = 1,33$. Применение двух значений удельных теплоемкостей для воздуха и продуктов сгорания позволяет получить значения параметров цикла, более приближенные к реальным (рис. 5). Хотя и в этом случае при высоких температурах разность значений удельных полезных работ составляет около 30 %.

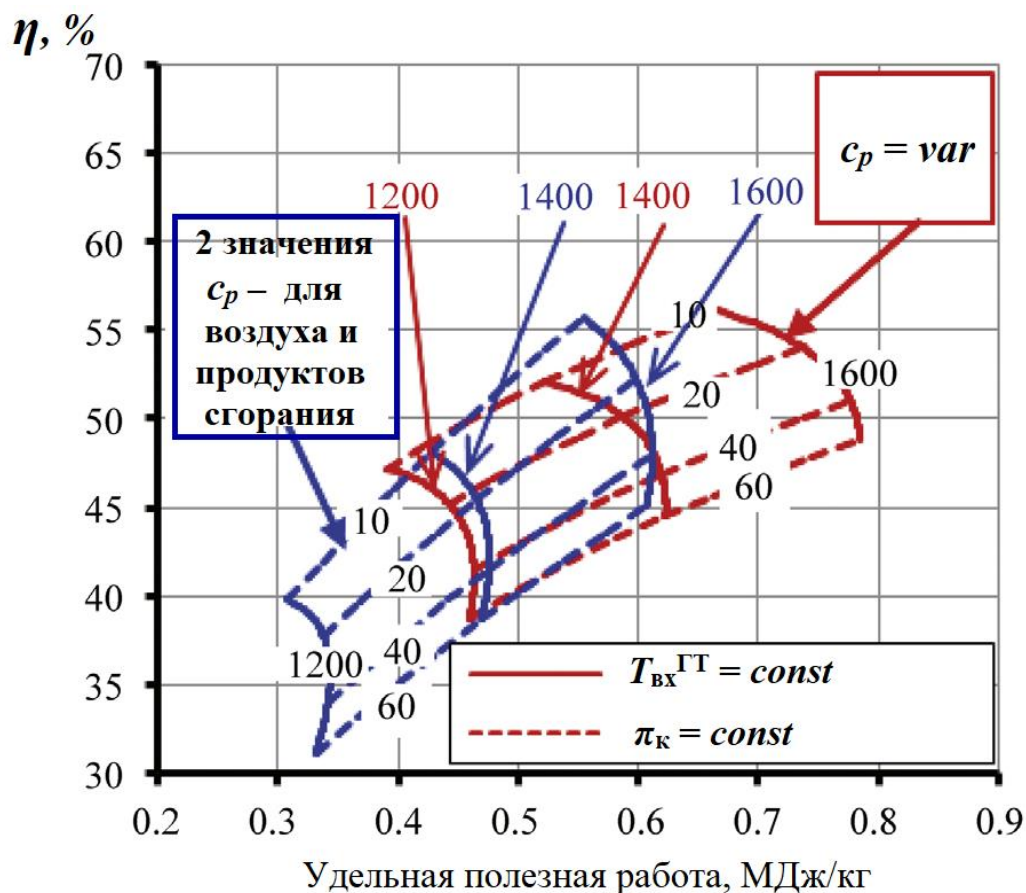


Рис. 5. Сравнение параметров цикла ГТУ при двух значениях удельной теплоемкости (для воздуха и для продуктов сгорания) и переменной удельной теплоемкости

Таким образом, при определении оптимальных параметров работы ГТУ необходимо учитывать наличие охлаждающих потоков в ГТ, а также изменение удельной теплоемкости рабочего тела в зависимости от его состава и температуры.

Список использованных источников

1. Nada T. Performance characterization of different configurations of gas turbine engines // Propulsion and Power Research. September 2014. P. 121–132. DOI: 10.1016/j.jprr.2014.07.005
2. Walsh P. P., Fletcher P. Gas Turbine Performance, Second edition. Blackwell Science Ltd, 2004. 646 p.